



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA DURANTE EL EJERCICIO EN SITUACIÓN DE HIPOXIA: REVISIÓN SISTEMÁTICA

GAROA SANTOCILDES MARTINEZ

Directora:

Nuria Garatachea

Codirectora:

Raquel Bailón

DICIEMBRE 2014

*Facultad de Ciencias de la Salud y del Deporte
Grado de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia, por haberme apoyado incondicionalmente en la elección de esta carrera y en todas las decisiones que he tomado, por haberme acercado al mundo deportivo desde pequeña, y por permitirme hacer de mi pasión, mi profesión y mi forma de vivir.

Dar las gracias a mi tutora, la Dra. Nuria Garatachea, por la dedicación, la paciencia y el tiempo, y por haberme ayudado a realizar este trabajo desde el primer minuto hasta el último segundo.

También, me gustaría agradecer a todos esos profesores que han pasado por nuestro lado estos años. Todos nos dejan algún recuerdo, mejor o peor, que nos ayuda a formarnos profesional y personalmente.

Por último, me gustaría acordarme de los compañeros de clase y de los amigos que he conocido en estos cuatro años de carrera, por todos esos momentos académicos, personales y deportivos. Por haberme dado motivos para sonreír a cada paso.

Resumen

Objetivo: realizar una revisión sistemática de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante el ejercicio en hipoxia.

Método: de un total de 684 artículos pertenecientes a 3 bases de datos (Sport discus, PubMed y Web of Science), se seleccionaron 40 artículos, de los cuales 15 han sido incluidos en la revisión sistemática.

Resultados: De los 15 artículos seleccionados se extrajo la siguiente información: 1) referencias del artículo, 2) población del estudio (número de participantes, edad, sexo, y características, 3) características del estudio, 4) resultados, 5) conclusiones.

Conclusiones: Durante la realización de ejercicio en situación de hipoxia el sistema nervioso autónomo (SNA) realiza diferentes modificaciones a nivel cardiovascular, esto es debido a que nuestro organismo se adapta ante las diferentes situaciones de estrés. Estas adaptaciones dependen de la intensidad del ejercicio, de la duración de la exposición a la altitud, de la altitud a la que nos encontramos, del nivel de entrenamiento del sujeto.

Índice

1. Introducción.....	6
1.1 Variabilidad de la frecuencia cardiaca.....	6
1.1.1 Origen fisiológico.....	7
1.1.2 Análisis variabilidad frecuencia cardiaca.....	8
1.2 Variabilidad de la frecuencia cardiaca en esfuerzo.....	8
1.2.1 Efectos del entrenamiento sobre la variabilidad de la frecuencia cardiaca.....	9
1.3 Hipoxia.....	10
1.3.1 Concepto de hipoxia hipobárica.....	10
1.3.2 Hipoxia y entrenamiento.....	10
1.3.3 Adaptaciones cardiovasculares a la hipoxia.....	10
1.3.4 Variabilidad de la frecuencia cardiaca en hipoxia.....	11
2. Método.....	13
3. Resultados.....	16
4. Discusión.....	25
5. Conclusiones.....	29
6. Bibliografía.....	31
7. Anexos.....	33

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha ido en aumento la práctica de actividades deportivas en altitud. Cada vez nos encontramos con más adeptos al ocio deportivo o a la práctica deportiva de competición en altitud, por ejemplo no hay más que ver la importancia que están adquiriendo pruebas como los ultra- trails. Por otro lado, en las Olimpiadas de México 68' se dieron a conocer los efectos que la altitud o la hipoxia tienen sobre el organismo y su rendimiento, y este hecho dio lugar al nacimiento de la investigación y puesta en práctica del entrenamiento en altitud. Estos datos nos muestran como el tema del deporte en altura es una realidad en nuestros días y va adquiriendo cada vez mayor importancia.

La variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC), ha sido aceptada como un indicador de la función del sistema nervioso autónomo, especialmente de las fluctuaciones del sistema nervioso vagal (1). Este registro ha sido usado como indicador de la mortalidad y de episodios cardiovasculares, pero además, la VFC es usada para monitorizar el estado de entrenamiento, la carga y la adaptación de cada organismo al estrés producido por la práctica de actividad física (1).

Debido a la importancia de la práctica de actividad física en altitud y la relevante información que la VFC puede ofrecernos sobre las modificaciones de nuestro organismo y su capacidad de adaptación, se ha decidido realizar un análisis de la literatura existente sobre la variabilidad de la frecuencia cardiaca durante la práctica deportiva en altitud.

1.1 LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA

La variabilidad de la frecuencia cardiaca, (HRV: heart rate variability) tiene su origen en los impulsos generados en el nódulo sinoauricular (SA) del corazón. El impulso cardiaco se genera en las células del nódulo SA y se propaga a través de todas las células del miocardio, generando la contracción y relajación del músculo cardiaco.

El electrocardiograma (ECG) es un medio no invasivo que proporciona al instante un registro de la actividad cardiaca del corazón. En cada ciclo cardiaco en el ECG aparecen una serie de deflexiones u ondas. Un ECG normal muestra diferentes ondas principales, que se denotan por las letras (P,Q,R,S,T) y que se repiten de forma periódica. Se suele considerar el inicio del ciclo cardiaco la deflexión de la onda P, mientras que la onda T marca el final del mismo.

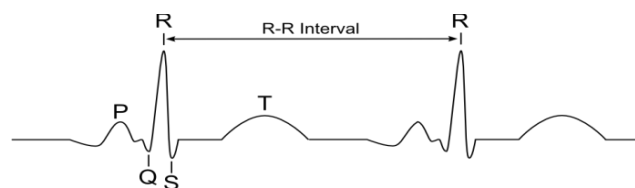


Imagen 1: electrocardiograma

Se denomina frecuencia o ritmo cardíaco al número de ciclos cardíacos que completa el corazón por minuto. El intervalo R-R se define como la distancia entre dos ondas R consecutivas y es utilizado como medida del ritmo cardíaco.

1.1.1 ORIGEN FISIOLÓGICO

Se denomina variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) a las variaciones del ritmo cardíaco en torno a su valor medio que se producen latido a latido. Estas variaciones tienen su origen en los impulsos generados en el nódulo SA (sinoauricular).

El ritmo cardíaco y su variabilidad están determinados por el ritmo de disparo de impulsos cardíacos por parte del nódulo SA. Diversos mecanismos se encargan del control del ritmo cardíaco, entre otros encontramos un control del sistema vegetativo autónomo, un control cerebral, reflejo(2).

Por ejemplo, el SNA (sistema nervioso autónomo) es uno de los encargados de controlar el ritmo de disparo a través de sus dos ramas; sistema nervioso simpático (SNS) y sistema nervioso parasimpático o vagal (SNP), la interacción de ambas es la que produce la VFC. Por lo general el SNS produce un aumento de la frecuencia de disparo del nódulo SA (por efecto de la adrenalina y noradrenalina) y el SNP reduce la frecuencia de disparo del nódulo SA (por efecto de la acetilcolina). A parte de los motivos mencionados, el SNA recibe información de diferentes sistemas que también influyen en la regulación de la VFC.

Parte de la VFC es causada por la arritmia sinusal respiratoria. Durante la inspiración el intervalo R-R disminuye, y por el contrario durante la espiración aumenta. La arritmia sinusal respiratoria es principalmente controlada por la actividad parasimpática, la cual es alta durante la espiración y es inexistente o tenue durante la inspiración.

Las diferencias entre sucesivos intervalos R-R, nos muestran el índice de control vagal o parasimpático.

1.1.2 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA

Como se ha demostrado a través de numerosos trabajos la VFC está formada por tres componentes principales (3):

1. Componente de alta frecuencia: HF (del inglés: *high frequency*): Se encuentra entre valores de 0.15 y 0.4 Hz y está relacionado con la frecuencia respiratoria, corresponde con la arritmia sinusal respiratoria (Respiratory Sinus Arrhythmia, RSA).

Este componente esta producido por la estimulación parasimpática del corazón, aunque hay que tener en cuenta que también la arritmia sinusal respiratoria puede verse influenciada por el volumen tidal y por la frecuencia respiratoria sin intervención del sistema parasimpático.

2. Componente de baja frecuencia: LF (del inglés: *low frequency*): los valores de este componente se encuentran entre 0.04 y 0.15 Hz. Este componente relacionado con el control de la presión arterial. Se considera que se debe a la estimulación simpática sobre el corazón, aunque también puede deberse a la influencia tanto simpática como parasimpática.
3. Componente de muy baja frecuencia: VLF (del inglés: *very low frequency*): Este componente tiene valores de entre 0 y 0.04 Hz. Este componente esta relacionado con la regulación vasomotora periférica.

El ratio LF-HF (LF/HF), muestra las interacciones entre el sistema simpático y parasimpático, y es denominado balance simpático-vagal, sus altos valores sugieren una predominancia simpática.

1.2 VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA EN ESFUERZO

A través de diferentes estudios se ha llegado a la conclusión de que el incremento del ritmo cardiaco es debido a una inhibición vagal, mientras que un mayor incremento es causado por una mayor actividad simpática (1,3).

El análisis de la VFC es usado para evaluar el control autónomo sobre la frecuencia cardiaca (FC) durante el ejercicio. El incremento de la FC debido al incremento de las demandas metabólicas esta ligado con una disminución de la VFC, y por lo tanto una disminución de la VFC muestra como resultado una reducción de la actividad vagal durante el ejercicio (1).

Existen trabajos (1,3) que muestran la relación entre el componente LF y la fluctuación de la presión arterial debido a los barorreceptores. El hecho de la existencia de cambios en el

componente LF durante ejercicios de baja intensidad sugiere que el ritmo 0.1 HZ no varía significativamente cuando el ajuste cardiovascular depende principalmente de la influencia vagal. Cuando la actividad del sistema simpático es mayor debido a la intensidad del ejercicio, la modulación de la FC a 0,1 Hz se reduce progresivamente hasta acabar desapareciendo. Este fenómeno refleja las modificaciones de los mecanismos de control de la presión arterial, particularmente el reajuste por parte de los barorreceptores durante el ejercicio muscular. Los músculos activos juegan un rol importante en las respuestas cardiocirculatorias al ejercicio, debido a esto el componente LF tiende a disminuir (3).

El efecto mecánico debido al aumento de la actividad respiratoria se considera que pueda ser responsable de las fluctuaciones del HF durante el ejercicio. Se considera que este mecanismo adquiere relevancia en ejercicios de alta intensidad (60- 65% VO_2 max), donde ocurre un gran aumento de la ventilación pulmonar (3).

Numerosos estudios (1,3) han investigado los índices de la VFC en transición de una situación de reposo a ejercicio. En estos estudios se observa claramente una disminución de la VFC por la disminución de la actividad parasimpática. En esta transición de reposo a ejercicio, el componente HF disminuye mientras que el LF no muestra cambios en la mayoría de los estudios. Sin embargo hay controversias respecto al comportamiento del ratio LF/HF, algunos estudios (1) muestran que no hay cambios, mientras que otros hablan de un incremento del ratio (3).

Pocos estudios (1,3) han analizado la influencia en la VFC teniendo en cuenta las intensidades de ejercicio. Se considera que la VFC tiende disminuir progresivamente a intensidades por debajo de 50% VO_2 max, mientras que en intensidades más elevadas los valores tienden a estabilizarse. Aun así pocos de los estudios realizados muestran datos significativos (1).

1.2.1 EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO SOBRE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA

A lo largo del tiempo se ha podido comprobar que los atletas entrenados en resistencia tienen una profunda bradicardia, además, ha sido muy estudiada la disminución que de la FC en reposo que tienen estos deportistas. Parte de esta disminución de la FC se debe al ritmo cardíaco intrínseco. La bradicardia sinusal puede deberse también a la inhibición del tono vagal sobre el nodo sinusal. La influencia del SNS sobre esta baja frecuencia cardíaca en reposo no está todavía clara (1).

También han sido estudiadas las diferencias en la VFC entre personas entrenadas y no entrenadas. Aunque los datos no son consistentes debido a los diferentes análisis de datos realizados en cada estudio, los resultados obtenidos muestran que en personas entrenadas la VFC y el componente HF son generalmente mayores. Los resultados son menos consistentes en cuanto al análisis del componente LF (1).

1.3 HIPOXIA

1.3.1 CONCEPTO DE HIPOXIA HIPOBÁRICA

La hipoxia es una disminución de la presión parcial de oxígeno (PO_2), en el caso de la hipoxia hipobárica esto se debe a la disminución de la presión atmosférica a medida que se aumenta en altitud. Pese a la disminución parcial de oxígeno, la concentración de oxígeno en el aire no varía (20.9%). Debido a la disminución de la presión parcial de oxígeno, nos encontramos con un menor gradiente de presión entre el interior y el exterior de las células, lo cual dificulta el transporte de oxígeno a los tejidos y células, y por lo tanto supone una disminución en el aporte de oxígeno y como consecuencia una disminución de su rendimiento (4).

1.3.2 HIPOXIA Y ENTRENAMIENTO

El entrenamiento en altitud difiere del entrenamiento a nivel del mar, las diferentes adaptaciones que sufre el organismo producen alteraciones en las funciones básicas y por tanto un cambio en los diferentes factores que intervienen en el rendimiento.

Es evidente que los efectos de la hipoxia son diferentes dependiendo del grado de exposición, hipoxia intermitente o prolongada. La masa corporal y muscular se reduce significativamente después de exposiciones prolongadas a la hipoxia. Como consecuencia de estas exposiciones, el tamaño de las fibras musculares se reduce y debido a esta reducción, hay un aumento relativo de la densidad de los capilares. En contra de estos resultados, recientes estudios (5) muestran que durante un limitado tiempo de entrenamiento aeróbico en hipoxia, los efectos de la hipoxia sobre el músculo son diferentes, ya que se mejora el tamaño de la fibra, la capilaridad, la concentración de mioglobina muscular y la capacidad oxidativa del músculo. Para lograr estos positivos resultados sugieren la necesidad de combinar el entrenamiento de hipoxia con normoxia.

1.3.3 ADAPTACIONES CARDIOVASCULARES A LA HIPOXIA

En situaciones de hipoxia hipobárica el organismo realiza diferentes adaptaciones para intentar suplir las carencias que la disminución de la presión parcial de oxígeno provoca en el organismo.

A nivel cardiovascular las primeras adaptaciones a la alta altitud son un aumento de la frecuencia cardíaca, de la presión arterial y del gasto cardíaco, debido al aumento actividad simpática y la retirada de la actividad parasimpática. Además, nos encontramos con una vasoconstricción de las arterias pulmonares, vasodilatación de las arterias periféricas y cerebrales y un aumento de la contracción cardíaca.

En situación de hipoxia aguda la frecuencia cardiaca en reposo y en ejercicios submáximos aumenta, pero se mantiene la frecuencia cardiaca máxima. En hipoxia crónica, hay una disminución progresiva de la frecuencia cardiaca en reposo y en ejercicios submáximos, pero se mantienen aun así por encima de los valores de normoxia y se observa una disminución de la frecuencia cardiaca máxima.

En cuanto a las adaptaciones respiratorias, en situación de hipoxia hay un aumento de la ventilación pulmonar. La ventilación pulmonar aumenta (estimulación de los quimiorreceptores periféricos) produciendo un estado de hiperventilación en el que puede eliminarse demasiado dióxido de carbono, lo que conlleva una alcalosis respiratoria (aumento del pH sanguíneo).

Como resultado de la hiperventilación y la estimulación de los quimiorreceptores, se activa el eje simpático-adrenérgico que induce una adaptación y redistribución del flujo sanguíneo a los órganos con mayores demandas metabólicas. El incremento de la actividad simpática en altitud esta directamente relacionado con el incremento de la concentración de catecolaminas plasmáticas y con la desensibilización del receptor adrenérgico.

1.3.4 VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA EN HIPOXIA

En altitud, situación de hipoxia, disminuye el intervalo R-R, mientras que aumenta el ratio LF/HF y la presión sanguínea sistólica, estos cambios nos indican la presencia de la actividad simpática. Por lo tanto, la exposición aguda a la altitud, supone un aumento de la dominancia simpática cardiaca, provocando un aumento de la frecuencia cardiaca. Las personas entrenadas muestran mayor capacidad de mantener una mayor oxigenación sanguínea sin aumentar la ventilación y reducen la activación simpática en hipoxia (5).

Durante el ejercicio hay una significativa disminución de los componentes de la VFC en comparación con el ejercicio en normoxia. Sin embargo, en estudios realizados en los que los deportistas tras periodos de aclimatación y tras haber vivido en altura y entrenado a baja altitud, incrementaron el componente LF y el ratio LF/HF. Este incremento sugiere que el entrenamiento intermitente en hipoxia incrementa la respuesta del SNA a través del incremento de la actividad simpática (6). Además, en altitud hay una retirada del control vagal tanto en ejercicio como en reposo(7).

Se ha encontrado una correlación entre la modulación simpática y vagal en situación de normoxia y la SPO₂ (saturación parcial de oxígeno), y situación de hipoxia. Individuos con mayor modulación simpática (%LF) en normoxia tienen una mayor SPO₂ durante el ejercicio en hipoxia, e individuos con mayor modulación vagal (%HF) en normoxia suelen tener una menor SPO₂ en ejercicio en hipoxia. Esta predicción nos da la posibilidad de usar esta correlación para predecir la capacidad individual a la aclimatación a la altitud (8).

El entrenamiento aeróbico a intensidades moderadas en hipoxia puede proteger la actividad neurovegetativa de los efectos de la hipoxia. Se considera que la estancia continua en situación de hipoxia, altitud, es determinante para las adaptaciones cardiovasculares y autónomas, ya que las exposiciones intermitentes a la altitud limitan estas adaptaciones, aunque estas adaptaciones dependen del ratio de hipoxia y normoxia. Así, los efectos de la exposición continua a la hipoxia persisten cuando comienza el entrenamiento en situación de normoxia, añadiendo así la mayor regulación simpática en ejercicio y después, a su vez, limitando la disminución de la actividad simpática normalmente encontrada tras un ejercicio aeróbico (9).

Finalmente, el seguimiento del entrenamiento a través de la VFC se presenta como relevante ya que nos puede ayudar a detectar estados tempranos de fatiga o de sobrentrenamiento, y por tanto la necesidad de adaptar los entrenamientos. Este hecho adquiere un interés especial durante entrenamientos en altitud donde los efectos del entrenamiento aeróbico difieren de los realizados en normoxia. El caso de vivir alto y entrenar bajo, o de exposición intermitente a la altitud, es aún más específico ya que, las repetidas exposiciones a la altitud presentan efectos que se transfieren a los entrenamientos en normoxia. Sin embargo, estos efectos de la hipoxia no tienen porque necesariamente afectar al resultado final, es decir, al rendimiento (9).

2. MÉTODO

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos electrónicas y la estrategia de búsqueda se aplicó en tres bases de datos diferentes *Pubmed*, *Sport Discus* y *Web of Science*. La búsqueda bibliográfica se realizó hasta la fecha de 30 de septiembre de 2014.

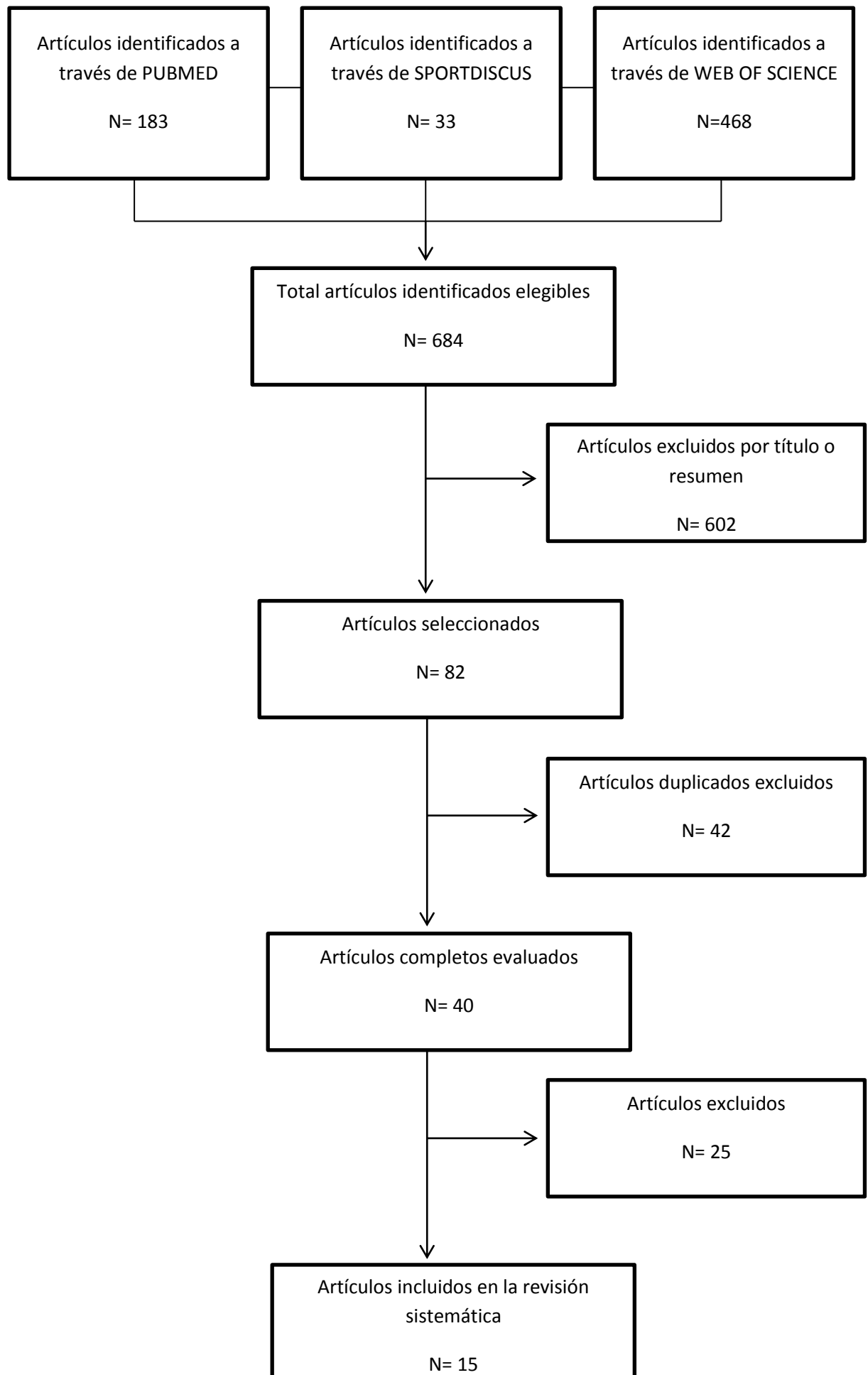
La estrategia de búsqueda fue aplicada independientemente en cada base de datos, y en cada una de ellas se aplicó en tres idiomas diferentes (francés, inglés y castellano). Las palabras clave utilizadas para identificar los artículos de interés para la realización de la revisión fueron “variabilidad de la frecuencia cardiaca”, “hipoxia”, “altitud”, “ejercicio”. Esta estrategia de búsqueda se utilizó de diferente forma en función de la base de datos y del idioma.

Una vez, identificados los artículos potencialmente válidos se procedió a la selección y exclusión de artículos a través del título y de la lectura de resúmenes. Los criterios de selección de los artículos fueron los siguientes:

- Humanos: se excluyeron todos los artículos en los que las pruebas o investigaciones estuvieran realizadas con animales. Los artículos tenían que aportar información sobre pruebas realizadas con personas humanas.
- Adultos: se excluyeron todos los artículos de niños, fetos, neonatos... los estudios debían ser de personas adultas.
- Sujetos sanos: se excluyeron todos los estudios sobre casos clínicos, así como aquellos de personas con patologías.
- VFC: el estudio debía imprescindiblemente hablar de la variabilidad de la frecuencia cardiaca.
- Ejercicio: los estudios debían basarse en la relación de la VFC con el ejercicio físico.
- Hipoxia: los estudios debían realizarse en situación de hipoxia, concretamente de hipoxia hipobárica, siendo posible el caso de la hipoxia normobárica en laboratorio o cámara. Los estudios sobre hipoxia hiperbárica fueron excluidos.

Tras el análisis de títulos y resúmenes, y tras la exclusión (anexo 1) de todos los artículos que no cumplían nuestros criterios de selección nos quedamos con 40 artículos que podrían resultar válidos. Estos artículos fueron analizados exhaustivamente a texto completo, de aquí 12 fueron excluidos porque no cumplían los requisitos necesarios para ser utilizados en la revisión o porque no aportaban información específica sobre el tema a tratar. Otros 13 artículos no pudieron ser utilizados ya que no se disponían a texto completo.

Figura 1: organigrama criterios de selección de artículos



Finalmente, 15 artículos fueron analizados e incluidos en la revisión. De estos artículos, a través de un formulario de datos estandarizado, se extrajeron los datos más importantes:

1. Referencias del artículo: autor, año.
2. Información sobre la población objeto de estudio: número de participantes, edad, sexo y características (nivel competición, capacidades físicas...)
3. Diseño del estudio: Altitud a la que fue realizado, características del protocolo de actuación...
4. Resultados: resultados principales del artículo, obtenidos en el estudio realizado.
5. Conclusiones: las principales conclusiones extraídas del artículo.

3. RESULTADOS

Tras el proceso de selección y análisis de artículos, un total de 15 artículos han sido utilizados para realizar la revisión sistemática. Todos los estudios que han sido analizados fueron realizados entre el año 2001 y el año 2013, por lo que son estudios relativamente recientes.

Si analizamos las diferentes características de los estudios seleccionados, podemos ver que el número mínimo de participantes utilizados para los estudios es de 7, siendo el máximo 24. Los sujetos participantes en las investigaciones han sido adultos y únicamente en cuatro estudios se ha contado con participación femenina (10-13). El perfil de los participantes es muy variado, desde personas sedentarias hasta deportistas de élite (copa del mundo).

Las pruebas de los estudios han sido llevadas a cabo tanto en campo (hipoxia hipobárica) como artificial o inducida (hipoxia normobárica: cámara o laboratorio). La altura mínima utilizada para tomar mediciones en situación de hipoxia ha sido de 1200 metros de altitud (o su equivalente de porcentaje de oxígeno) y la máxima de 5500 metros.

El estudio realizado por Mairer K. et al (2013) (14), nos muestra como la actividad simpática aumenta y hay una retirada de la actividad parasimpática en situación de hipoxia. Esto produce una disminución de la VFC y una alteración en sus componentes (disminución de los componentes LF, HF, HFnu y aumento de los componentes LFnu y del ratio HF/LF). Además, añade que el ejercicio no produce alteraciones adicionales sobre la VFC, es decir que las alteraciones son debidas al efecto de la hipoxia y que la actividad física realizada en esta situación no produce más alteraciones.

Si analizamos lo que ocurre tras la práctica de ejercicio en altitud (15) podemos ver como 24 horas después de la práctica deportiva aquellos sujetos que hayan experimentado una disminución de la presión parcial de oxígeno mayor del 10%, tienen una mayor actividad simpática (\uparrow LFnu) y una retirada de modulación parasimpática (\downarrow HFnu). Sin embargo, las variaciones registradas en el ratio HF/LF no son significativas. 48 horas después de la práctica deportiva hay un aumento de los componentes LF, HF, LFnu y LF/HF y una disminución del componente HFnu, sin embargo estos resultados no son significativos. De igual forma tres días después de la práctica deportiva no hay alteraciones significativas en la VFC. En este artículo se habla de la importancia del control de la carga y de la actividad durante el ejercicio y después, ya que esto determinará una buena recuperación, evitar una excesiva fatiga y alteraciones del control autónomo.

Buchheit M. et al. (2012)(16) han observado como la VFC disminuye tras la realización de ejercicio en altitud, pero que tras 4 horas se regresa a valores normales o de homeostasis.

Diferentes estudios (11,17) coinciden en que durante el ejercicio en altitud hay un aumento de la circulación plasmática de catecolaminas y beta- adrenérgicos. Además, están de acuerdo en que durante la práctica de actividad física en situación de hipoxia hay una disminución significativa de la VFC debido al aumento de la actividad simpática y de la retirada vagal.

El artículo de Gibelli G. et al. (2008)(11) nos da una amplia información acerca de las variaciones que la VFC sufre en diferentes situaciones. La VFC en reposo es menor en altitud que a nivel del mar, además la VFC es significativamente más baja en ejercicio en altitud que durante ejercicio a nivel del mar. A pesar de contar con una buena modulación de la actividad simpática, en hipoxia sigue habiendo un aumento de la frecuencia cardiaca y una disminución de la VFC. También han observado que los sujetos sanos en la práctica de actividad física en hipoxia tienen menor riesgo de tener arritmias ventriculares.

Zupet P. et al. (2009) (18) han analizado las diferentes alteraciones que ocurren en función de la intensidad del ejercicio. En ejercicios de baja intensidad el componente LF disminuye a medida que se aumenta en altitud. HF y el ratio HF/LF no cambian significativamente con la altitud, aunque sí que es cierto, que cuando encontramos una SPO_2 baja hay una disminución del componente LF y un aumento del componente HF. De todas formas en ejercicios de baja intensidad las variaciones o diferencias que encontramos entre hipoxia y normoxia no son significativas. En ejercicio de alta intensidad encontramos valores similares a 400m y a 4200m, y no hay cambios significativos en ninguno de los componentes de la VFC. En reposo encontramos una bajada de la SPO_2 y la VFC disminuye en altitud. A pesar de los resultados que han obtenido en este estudio, se remarca que las pruebas han sido realizadas fuera de condiciones naturales y que por lo tanto serían necesarias más pruebas para poder corroborar estos resultados.

En línea con Zupet P. et al. (2009)(18) nos encontramos otro estudio (19) que también analiza las alteraciones en función de la intensidad del ejercicio. Al Haddad H. et al. (2012) (19), han observado un aumento de la actividad simpática en hipoxia. En ejercicios submáximos en moderada hipoxia hay un retraso de la reactivación parasimpática post-ejercicio y hay un aumento del ratio HF/LF debido a la predominancia simpática. Sin embargo en ejercicios supramáximos no hay cambios en la VFC si se compara con los valores de normoxia. Si la estimulación simpática es elevada, una estimulación adicional debido a una caída de la SPO_2 no va a perjudicar la reactivación parasimpática.

El artículo de Schmitt L. et al. (2006)(20) comprueba que a 1200 metros de altitud hay un aumento del componente HF, que protege al sujeto y ofrece los efectos positivos del entrenamiento en altitud, aun así consideran que esta altitud no es suficiente para observar los efectos que la hipoxia produce sobre el organismo. A 1850m hay un aumento del componente LF y una disminución de la VFC, el componente HF disminuye durante los primeros 5 días a esta altitud y va aumentando progresivamente los siguientes 6 días. A 1850m podemos observar claramente la retirada parasimpática y por lo tanto la disminución de la VFC. Saito S. et al. (2005) (13) por su parte, han observado, que con la disminución de la presión barométrica, hay una caída de los componentes HF y LF, habiendo observado estos datos a 3500 metros de altitud, además han encontrado una correlación positiva entre la SPO_2 y el componente LF.

Smith L. et al. (2008) (12) compararon las diferencias existentes entre alternar vivir en altura y entrenar bajo, y vivir bajo y entrenar bajo. Observaron una progresiva disminución de la VFC antes y después de las sesiones de entrenamiento, pero estas modificaciones desaparecieron tres semanas después de la intervención viviendo en altura y entrenando bajo. Sin embargo

tras tres semanas de la intervención de entrenar y vivir bajo hubo una disminución de la VFC y del componente LF. Aun así, estos datos pueden deberse a que los grupos estuvieron expuestos a diferentes cargas de trabajo antes de la intervención y de la medición.

Otro de los estudios (10), nos indica que en intervenciones en las que se vive bajo y entrena bajo hay una disminución del componente LFnu (esto no ocurre cuando se entrena bajo y vive alto), sin embargo el componente HF y el ratio HF/LF se mantienen constantes. 15 días después de los entrenamientos (tanto la prueba de vivir alto/entrenar bajo, como en vivir bajo/entrenar bajo) el componente LF disminuye si lo comparamos con los valores que suele ostentar normalmente. Durante las exposiciones intermitentes a la hipoxia (vivir alto y entrenar bajo) hay adaptaciones cardiovasculares del SNA, pero como han podido observar estas desaparecen en 15 días.

En cuanto a la alternancia de vida en altitud con entrenamientos en bajo Buchheit M. et al. (2004)(7) han observado que en los ciclos de vivir alto/entrenar bajo hay un aumento del componente LF y del ratio HF/LF durante y post ejercicio, debido a una predominancia del sistema simpático, además el porcentaje LF/HF varía en mayor medida, cosa que no ocurre durante el ejercicio en normoxia. Además han podido comprobar la existencia de una mayor caída de los componentes LF/HF en ejercicio en hipoxia en comparación con normoxia. Añaden que el ejercicio en hipoxia provoca una caída de la VFC adicional, es decir, la caída de la VFC es mayor durante el ejercicio en hipoxia que durante el ejercicio en normoxia, por lo que la hipoxia es responsable de esta caída adicional.

Bernardi L. et al. (2001) (5) han comprobado que en la hipoxia progresiva hay una disminución de la VFC y del componente HF por la retirada de la actividad vagal y la activación de la actividad simpática, sin embargo, no se observan cambios significativos en el componente LF. Durante el entrenamiento interválico en hipoxia hay una menor disminución de la VFC, ya que disminuye el efecto del SNA. Este hecho puede resultar beneficioso ya que una disminución de la actividad simpática conlleva menores demandas de O_2 .

Cornolo J. et al. (2006)(21) han analizado las respuestas sobre la VFC de los nativos de alta altitud (habitantes de los Andes). La VFC disminuye con la altitud tanto en los nativos sedentarios como en entrenados. Si que es cierto que han comprobado que los sujetos entrenados tienen una mayor modulación parasimpática (aumento del componente HF) y una menor modulación simpática (disminución HF). Algunos de los sujetos realizaron una maratón a 4200 metros, en estos se registro 6-8 horas post- maratón una disminución de la VFC (pudiéndose debido a la fatiga), un aumento del control simpático (aumento LF y ratio LF/HF) y una disminución parasimpática. 20-24h post- maratón, tenían una disminución del intervalo R-R, debido a la fatiga pero este fue volviendo a los valores normales debido a la restauración parasimpática (disminución LF y ratio LF/HF). Han podido ver como los nativos de altitud presentan una mayor modulación parasimpática, teniendo iguales o mejores resultados en ejercicio en altitud, además de contar con menores efectos autónomos, residuales y presentando una mejor recuperación.

Jouanin J.D. et al. (2009)(22) vieron como en exposiciones de 3 días a la altitud, el segundo día es cuando hay una mayor caída de la VFC. Pudieron comprobar que durante la realización de

ejercicio en altitud el componente HFnu disminuye, el LFnu aumenta y el ratio LF/HF también. El segundo día hay una disminución de la actividad autónoma y el tercer día de intervención aumenta la modulación simpática (HFnu aumenta, LF y ratio LF/HF disminuyen). El comportamiento simpático fue muy estudiado, vieron que durante el proceso de aclimatación hay una caída de la actividad simpática, y que el ajuste simpático refleja el impacto del entrenamiento intenso sobre la VFC. Por otro lado, comprobaron que el ratio LF/HF muestra una mayor caída de la actividad parasimpática que simpática en esfuerzos grandes en altitud y que el imbalance simpático-vagal tras el ejercicio en alpinismo se debe a la fatiga y a la alta altitud.

Tabla 1 : Principales características de los estudios seleccionados en la revisión

REFERENCIAS DEL ARTÍCULO	POBLACIÓN DEL ESTUDIO (número, edad, sexo, características población)	CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO	RESULTADOS	CONCLUSIONES
Mairer K. et al. (2013) (14)	n= 20 27.9 ± 3.9 años masculino	Estudio transversal Pruebas de referencia (normoxia) =575m Hipoxia normobárica (cámara hipoxia). FiO ₂ = 11% (5500m) Prueba en cicloergómetro.	<u>Hipoxia</u> : ↓ LF, ↓ HF, ↓ HFnu, ↑ LFnu, ↑ HF/LF ratio. Debido al aumento de la actividad simpática (defensa órganos) y retirada vagal. El ejercicio no modifica adicionalmente los efectos de la hipoxia sobre VFC.	↓VFC en hipoxia por predominancia simpática. El ejercicio no modifica adicionalmente los efectos de la hipoxia sobre VFC.
Koelwyn G. J. et al. (2013) (15)	n= 11 25 ± 4 años Skaters, ciclistas, esquiadores, triatletas.	Estudio trasversal. Prueba en hipoxia simulada, mediante respiración de aire comprimido (16.5% ± 0.5 O ₂)	24h post- ejercicio, sujetos con una disminución de la SPO ₂ >10%: ↑ LFnu (activación simpática), ↓ HFnu (retirada parasimpática), cambios HF/LF no significativo.	24h post- ejercicio cambios en los parámetros VFC en sujetos con una disminución SPO ₂ > 10%. 48h post- ejercicio los cambios no son significativos.
Buchheit M. et al. (2012) (16)	n=8 18.6 ± 5.3 años masculino Corredores de media-larga distancia	Hipoxia normobárica = FiO ₂ 15.4 % (=2400m altitud). Sesiones HIT.	Los valores de la VFC ↓ tras el ejercicio, pero tras 4 horas vuelven a valores de homeostasis.	Los valores de la VFC ↓ tras el ejercicio, pero tras 4 horas vuelven a valores de homeostasis.
Woorons X. et al. (2011)(17)	n=7 29.8 ± 6.5 años Masculino Práctica deportiva recreacional (3- 4h semana)		↑ actividad simpática durante el ejercicio ↑ nivel de circulación de catecolaminas	↑ actividad simpática en ejercicio en altitud, ↓VFC.

Zupet P. et al. (2009)(18)	n=9 masculino	Normoxia= 400m Hipoxia=4200m	<u>Ejercicio baja intensidad:</u> ↓ LF HF y HF/LF ratio cambios no significativos <u>Ejercicio alta intensidad:</u> Cambios no significativos en los componentes VFC.	Ejercicios de baja intensidad provocan una disminución del componente LF a medida que aumenta la altitud.
Gibelli G. et al. (2008) (11)	n=8 42 ±9 años masculino(n=7), femenino (n=1)	Normoxia= 152m Hipoxia= 5180m Datos recogidos tras 15 días en altitud (aclimatación finalizada)	Durante ejercicio ↑ catecolaminas arteriales y beta- adrenérgicos. ↓ VFC en altitud por la estimulación simpática y retirada vagal.	Significativa ↓ VFC en ejercicio en altitud en comparación con normoxia.
Schmitt L. et al. (2008) (12)	n= 11 23 ±4 años masculino (n=6), femenino (n=5) n=7 biatletas (copa del mundo) / n=2 esquiadores combinada nórdica (copa de europa)/ 2 esquiadores de fondo(copa del mundo)	Hipoxia: 1200m de altitud.	<u>Vivir alto/entrenar bajo:</u> Progresivo ↓ VFC pre- y post sesiones. No cambios en VFC después de 3 semanas de la intervención. <u>Vivir bajo/entrenar bajo:</u> 3 semanas después de la intervención ↓VFC, ↓LF Los cambios pueden deberse por el protocolo (diferente carga pre-intervención.)	Tres semanas después de sesiones de entrenamiento : Entrenamiento vivir alto/ entrenar bajo, no experimenta cambios en la VFC. Vivir bajo/entrenar bajo : ↓VFC y ↓LF
Cornolo J. et al. (2006) (21)	n= 18 19.1 ±2 años masculino (n=16), femenino (n=2) nivel nacional natación	Vivir bajo =altitud 1200m Vivir alto (hipoxia normobárica)= 5 días (FiO ₂ 17.4 % = 2500m) y 6 días (16.4 % FiO ₂ =3000m) Entrenar bajo= 1200m	Tras un ciclo de entrenamiento, el componente LFnu ↓ cuando se vive bajo y entrena bajo, pero no cuando se vive alto y se entrena bajo, HFnu y ratio HF/LF se mantienen constantes. Tras 15 días de entrenamiento en normoxia tras ciclos de vivir alto entrenar bajo, y vivir bajo entrenar bajo, ↓LFnu en comparación al inicio de los entrenamientos.	Durante exposiciones intermitentes a la hipoxia (vivir alto/entrenar bajo) hay adaptaciones cardiovasculares y del SNA a la hipoxia en reposo, pero éstas desaparecen tras 15 días de entrenamiento en normoxia.

Schmitt L. et al. (2006) (20)	n=8 17.0 ± 1.8 años masculino nadadores nivel nacional	Estudio longitudinal post facto. Hipoxia: 1200metros y 1850 metros de altitud.	1200m: ↑HF (protege al sujeto, beneficios positivos del entrenamiento en altitud) 1850m: ↑LF, ↓VFC, ↓HF (HF disminuye durante los primeros 5 días, y luego va aumentando)	La retirada parasimpática y disminución VFC se observa a los 1850m.
Cornolo, J. et al (2005)(10)	n=24 (13 entrenados, 11 sedentarios) 27.8 ± 2.0 años sedentarios; 27.4 ± 2.3años entrenados. masculino todos los sujetos son nativos de localidades de alta altitud de los Andes (3500-4300m). De los entrenados 8 sujetos participantes de la maratón olímpica “meseta de Bombóm” (4220m de altitud)	Hipoxia: 4300m	En alta altitud, 1) ↓VFC tanto en personas entrenadas como en sedentarias. 2)En sujetos entrenados ↑ modulación parasimpática (↑HF) y ↓ modulación simpática (↓ HF). 6- 8h post- maratón en altitud: 1)↓VFC (fatiga) 2)↑ control simpático (↑ LF y HF/LF ratio) 3) disminuye control parasimpático. 20-24h post- maratón, intervalo R-R está bajo, debido a la fatiga, pero se vuelve a los valores normales de VFC (restauración parasimpática (↓ LF y LF/HF)) Los nativos de alta altitud tienen una mayor modulación parasimpática, en ejercicio en altitud tienen similar o mejor rendimiento con menores efectos autónomos, residuales y mejor recuperación.	Vivir en altitud no supone un problema para los beneficios del entrenamiento sobre el SNA. Mayor predominancia simpática en el maratón en altitud, pero se restaura en 24h. Los sujetos entrenados presentan una mayor modulación parasimpática en altitud.
Saito S. et al. (2003)(13)	n=21 31 ± 10 años masculino (n=8), femenino (n=13) no deportistas	Altitud: 3456m	A 3500 m, disminución de los componentes HF y LF.	↓ HF y ↓ LF con la disminución de presión barométrica. Correlación positiva entre la SPO ₂ y parámetro LF.

Buchheit M. et al. (2004) (7)	n=12 30.9 ± 2.3 años masculino práctica deportiva recreacional (2-4h de entrenamiento por semana)	Hipoxia normobárica en cámara= 11.5% O ₂ =4800m altitud	<u>Vivir alto/entrenar bajo</u> (exposición moderada a la hipoxia intermitente): ↑ LF y ↑ LF/HF durante y post- ejercicio (predominancia simpática). Mayor variación del porcentaje LF/HF (este no varía en esfuerzo en normoxia). Mayor caída LF y HF en ejercicio en hipoxia que en normoxia.	El ejercicio en hipoxia provoca una caída de VFC adicional, en comparación con la caída en ejercicio en normoxia. El porcentaje LF/HF varía más en los que viven alto y entrenan bajo y ↑ LF por la predominancia simpática.
Bernardi L. et al. (2001) (5)	n= 18 26 ± 2 años masculino soldados armada		<u>Hipoxia progresiva</u> : ↓ HF, no cambios significativos LF. ↓ VFC (retirada actividad vagal y activación actividad simpática.) <u>Entrenamiento interválico hipoxia</u> : menor disminución VFC. Disminuye el efecto hipoxia sobre SNA.	Entrenamiento interválico en hipoxia disminuye la respuesta SNA. Puede resultar beneficioso, ya que la disminución de la actividad simpática supone menores demandas de O ₂ .
Al Haddad H et al. (2012) (19)	n=10 32.7 ± 4.0 años masculino	Normobaric hipoxia, en laboratorio (simulación 2400m).	<ul style="list-style-type: none"> - Activación simpática en hipoxia - Ejercicios submáximos en moderada hipoxia: 1) retrasan la reactivación parasimpática post-ejercicio, 2) ↑ HF/LF ratio por predominancia simpática post-ejercicio. - En ejercicios supramáximos en hipoxia: 1) no hay cambios en VFC en cuanto a valores de normoxia 2) cuando la activación simpática es elevada, una estimulación adicional (↓ SPO₂) no perjudica la reactivación parasimpática. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tras ejercicios submáximos en hipoxia se altera la reactivación parasimpática post- ejercicio. - Tras ejercicios supramáximos el efecto de la hipoxia sobre VFC no es aparente.

Jouanin J.C. et al. (2009) (22)	n= 12 22.1± 0.8 años Masculino soldados	Programa en altitud entre 2533-4810 metros	<ul style="list-style-type: none"> - En ejercicio en altitud: ↓HFnu, ↑LFnu, ↑ HF/LF - 2º día de ejercicio en altitud: ↓ actividad SNA. - El día tres de exposición ↑modulación parasimpática (↑HFnu. ↓LF/HF, ↓ LF. - El ratio LF/HF causa mayor caída de la actividad simpática que parasimpática en grandes esfuerzos en alta altitud. <p>Ralación linear entre LF/HF y SPO₂.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Existe una imbalance simpático vagal tras actividad de alpinismo por la fatiga y por la alta altitud. - La aclimatación disminuye la actividad simpática.
------------------------------------	--	---	---	--

LF: Abreviaturas: LF: low frequency/ HF: high frequency/ nu: normalised units / VFC: variabilidad de la frecuencia cardiaca/ SNA: sistema nervioso autónomo / FiO₂ : fracción inspirada de oxígeno/ SPO₂ : saturación parcial de oxígeno/ HIT: high intensity training.

4. DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio era revisar la literatura existente en diferentes bases de datos sobre la VFC en situación de hipoxia durante la práctica de ejercicio físico. Tras la selección de los diferentes artículos que podían aportar datos de interés, el objetivo ha sido recopilar toda la información relevante con el fin de poder mostrar una información resumida y detallada.

La hipoxia es caracterizada por una caída de la presión de O_2 que es inspirado por el cuerpo, debido a una bajada de la presión barométrica. Esta disminución de la cantidad de O_2 que llega a las células del organismo produce adaptaciones y compensaciones cardiovasculares. Entre otras adaptaciones nos encontramos con un incremento de la frecuencia cardiaca y de la frecuencia respiratoria, y una reducción de la presión sanguínea. Cuando nos encontramos ante una situación de hipoxia aguda, hay una estimulación de los quimiorreceptores periféricos y un incremento de la vasodilatación local, eso produce un incremento de la actividad simpática y una caída de la actividad parasimpática (19). Además en situación de hipoxia hay un aumento de la circulación de catecolaminas arteriales y beta- adrenérgicos (11,17).

La VFC es un indicador no invasivo de las variaciones del ritmo cardiaco, R-R (latido a latido), que existen en torno a su valor medio. Como ya hemos indicado el SNA es el encargado de modular el funcionamiento del sistema cardiovascular y por lo tanto de modular la velocidad de disparo.

La VFC en reposo disminuye en altitud en comparación con nivel del mar, es decir, el estrés causado por la disminución del aporte de O_2 al organismo produce una disminución en la VFC. El ejercicio físico también supone un factor estresante para nuestro organismo, y este produce diferentes respuestas ante las modificaciones que la actividad física genera, el ejercicio físico también reduce significativamente la VFC, tanto en hipoxia como en normoxia. La VFC es aún más baja durante el ejercicio en altitud en comparación con el ejercicio a nivel del mar, es decir, la hipoxia produce una caída adicional de la VFC durante la práctica de actividad física (7,11). Sin embargo K. Mairer et al. (14) consideran que el ejercicio no modifica adicionalmente los efectos de la hipoxia sobre la VFC, es decir que las modificaciones de la VFC durante la práctica en ejercicio en hipoxia se deben a la hipoxia, no al ejercicio.

La VFC esta formada por tres componentes principales, el componente HF, que nos indica la estimulación parasimpática del corazón, el componente LF, indicador de la estimulación simpática, pero también de la parasimpática y el ratio LF/HF que nos indica el balance simpático- vagal. Estos componentes van modificándose según el tipo de ejercicio, de exposición, de altitud...

La VFC varía según el grado de exposición y la altitud a la que nos encontramos, ya que a cada altitud hay una presión parcial de oxígeno diferente. A 1200 metros de altitud nos encontramos con un aumento del componente HF, es decir un aumento de la actividad parasimpática, esto protege al sujeto y le otorga los beneficios positivos del entrenamiento en altitud. A pesar de ello, esta altitud no es suficiente para poder observar los efectos que la

altitud puede tener en el organismo (14). A 1850 metros, el componente LF aumenta, mientras que VFC y HF disminuyen (HF disminuye los primeros 5 días y luego va aumentando), con esto podemos decir, que 1850m es una altitud en la que ya hay una retirada vagal y un mayor efecto simpático sobre la modulación cardiaca (20). A 3500 metros, todos los parámetros disminuyen tanto el HF como el LF, esta bajada del componente LF se debe a la existencia de una correlación positiva entre el componente LF y la SPO_2 (13). A 5500m la tendencia se mantiene como a 3500m, LF y HF y el ratio LF/HF disminuyen, debido a una retirada vagal y mayor presencia simpática (14).

Diferentes estudios han analizado que ocurre durante y después de la práctica de actividad física en una situación de hipoxia. En el proceso de aclimatación hay una disminución de la actividad simpática (22) y durante el ejercicio hay una disminución del componente HFnu y un aumento del componente LFnu y del ratio LF/HF (disminución actividad parasimpática y aumento simpática), el tercer día consecutivo de ejercicio en altitud aumenta la modulación parasimpática (aumenta HFnu y disminuyen el ratio LF/HF y el componente LF) en comparación con los días precedentes (22). Se ha comprobado que tras un ejercicio a una altitud aproximada de 2400m la VFC baja tras el ejercicio, pero que tras 4 horas se recuperan los valores de homeostasis (16). 24 horas post- ejercicio aquellos sujetos que sufren una disminución de la SPO_2 mayor de un 10% tienen una mayor actividad simpática (mayor LFnu), mientras que experimentan una retirada vagal (menor HFnu). 48 post-ejercicio los cambios ya no son significativos, por lo tanto a las 48 horas se van restaurando los valores normales (15).

La intensidad del ejercicio es otro de los parámetros que influyen en la respuesta del SNA sobre la actividad cardiaca. En ejercicios de baja intensidad hay una disminución del componente LF, es decir de la modulación simpática, y probablemente de la parasimpática (18). En ejercicios submáximos encontramos que aumenta el ratio LF/HF por una predominancia simpática, habiendo además un retraso en la reactivación parasimpática post-ejercicio (19). Sin embargo, en ejercicios de intensidad supramáxima no hay cambios en la VFC en cuanto a los valores de normoxia (18,19).

La combinación de vivir en altura y entrenar a baja altitud, es un fenómeno muy extendido en los últimos años, cada vez más deportistas llevan a cabo planes de entrenamiento de este tipo. En los ciclos o intervenciones de entrenamiento basados, en vivir bajo y entrenar bajo se puede observar que el sujeto experimenta una bajada del componente LFnu (21), además tres semanas después de este ciclo de entrenamientos la VFC se encuentra disminuida así como el componente LF (12). En los planes de intervención en los que se vive alto y se entrena bajo, se ha comprobado que hay una progresiva caída de la VFC (12) a través de un aumento del componente LF y LF/HF ratio durante y post ejercicio, esto se debe a una predominancia simpática (7). 15 días después de la intervención el componente LFnu está más bajo que al inicio de la intervención (21), para encontrarnos que tres semanas después del plan de trabajo no se observan cambios en la VFC (12). Una exposición a la hipoxia progresiva disminuye la VFC y el componente HF, debido a la retirada vagal y a la activación simpática. Sin embargo el entrenamiento interválico en hipoxia disminuye la respuesta del SNA, disminuyendo la caída de la VFC (5).

Una cuestión que despierta mucho interés es lo que ocurre con aquellas personas autóctonas de lugares de alta altitud, en este caso J. Cornolo et al. (21), han analizado las respuestas de la VFC en habitantes de localidades de alta altitud en los Andes. Lo primero que han observado es que en altitud tanto las personas entrenadas como las sedentarias sufren una disminución de la VFC, pero a su vez han comprobado, que los sujetos entrenados presentan una mayor modulación parasimpática (aumento HF) y una menor modulación simpática (disminución LF). Algunos de los residentes en altitud realizaron una maratón a 4200m de altura, en ellos se observa que 6-8 horas después de la maratón sufrían una caída de la VFC, pudiéndose ser por la fatiga, así como un aumento del control simpático y disminución del parasimpático, viéndose en el aumento del componente LF y ratio LF/HF. 20-24 horas post- maratón la VFC estaba reducida, pero esta vuelve a valores normales debido a una restauración parasimpática (disminución LF y LF/HF). A través de este estudio se ha comprobado que los nativos de altitud tienen una mayor modulación parasimpática en altitud, pueden tener el mismo o mejor rendimiento en altitud, y cuentan con menores efectos autónomos, menos efectos residuales y con una mejor recuperación. Con esto se ha visto que vivir en altura no es un problema respecto a los beneficios que el entrenamiento tiene sobre el SNA.

En líneas generales, la tendencia habitual es que la práctica de actividad física en situación de hipoxia provoca un aumento de la actividad simpática y una reducción de la actividad parasimpática. El aumento de la actividad simpática es considerado un mecanismo para mantener el aporte de oxígeno en los órganos vitales, ya que en hipoxia hay una reducción de la cantidad de oxígeno que llega a nuestras células (14). Por otro lado un aumento de la actividad simpática supone la disminución de la VFC. La disminución de la VFC es considerado un predictor de arritmias ventriculares patológicas, así como de una posible repentina muerte cardíaca, tanto en sujetos sanos como en aquellos que tienen problemas cardiovasculares. Esto se debe a que la reducción de la VFC refleja cambios del control parasimpático al simpático. Aun así es un hecho, que una mayor actividad simpática y un aumento de catecolaminas durante el ejercicio en hipoxia dan lugar a arritmogenesis, sin suponer un problema cardíaco.

Por otro lado, aunque haya estudios que muestran que una reducción de la respuesta del sistema nervioso autónomo en altitud puede ser beneficioso ya que protege a los órganos de un excesiva y continua estimulación simpática, en exposiciones duraderas a la altitud, hay que tener en cuenta que una reducción de la respuesta nerviosa autónoma muestra la incapacidad del organismo a adaptarse a diferentes situaciones (13).

En resumen, según vamos aumentando en altitud podemos ir observando como aumenta la actividad simpática y se reduce la actividad parasimpática, esto protegerá nuestro organismo durante la actividad física en altitud y ayudará a suplir la caída de O_2 . Aproximadamente el tercer día de actividad física en altitud comenzará a aumentar la actividad parasimpática.

Tras la práctica de actividad física en altitud, los parámetros se van restaurando a valores de normoxia a partir de las 4h, encontrando que 48h post- ejercicio, no se observan cambios aparentes.

En cuanto a las variaciones según las intensidades de ejercicio vemos que en ejercicios de baja intensidad la modulación simpática es baja, en ejercicios submáximos hay un aumento de la predominancia simpática y en ejercicios supramáximos no se observan cambios en cuando a los valores de normoxia.

En ciclos de vivir bajo y entrenar bajo hay una disminución de la VFC y de modulación simpática y parasimpática. Cuando nos encontramos en ciclos de vivir alto y entrenar bajo, hay una bajada VFC ya que aumenta la modulación simpática. Tres semanas después de la intervención (vivir alto/ entrenar bajo) en hipoxia no se observan cambios en la VFC. El entrenamiento interválico en hipoxia disminuye la respuesta del SNA y la caída de la VFC.

Los nativos de localidades de altitud entrenados presentan una mayor modulación parasimpática y obtienen un rendimiento igual o mayor que el resto de los deportistas, además cuentan con menores efectos del SNA, residuales y con mejor recuperación.

5. CONCLUSIONES

Durante el ejercicio en altitud hay un aumento de la dominancia del sistema nervioso simpático y un retirada vagal. El SNA, ayuda a mantener el aporte necesario de O_2 y sirve de mecanismo protector para los órganos. Una falta de modulación del SNA sobre el corazón supondría que nuestro cuerpo no es capaz de adaptarse a las diferentes situaciones de estrés.

Las modificaciones que el SNA realiza sobre nuestro sistema cardiovascular son diferentes según la altitud, el grado de exposición, la duración, la intensidad del ejercicio y el nivel de entrenamiento. Pero en general, existe una activación del sistema nervioso autónomo en situación de hipoxia durante el ejercicio, esta modulación va desapareciendo y se va restaurando el equilibrio simpático- vagal, siendo prácticamente inexistentes las adaptaciones a las 3 semanas.

1200 metros es una altura suficiente para se registren efectos de la altitud. Los ejercicios de baja intensidad producen modificaciones cardiacas, pero no los ejercicios supramáximos. Las modificaciones que ocurren tras exposiciones interválicas a la altitud desaparecen tras 2 semanas.

Es importante seguir investigando en esta línea, buscando un protocolo de intervención estandarizado que nos podrá ofrecer resultados más concluyentes.

5. CONCLUSIONS

Pendant l'exercice en haute altitude, il y a une augmentation de l'activité du système nerveux sympathique et un retrait parasympathique. Le système nerveux autonome (SNA) permet de maintenir un apport d'oxygène adéquat et sert de mécanisme de protection des organes. Un manque de modulation du système nerveux autonome sur le cœur supposerait que notre corps ne soit pas capable de s'adapter aux différentes situations de stress.

Les modifications que le SNA réalise sur notre système cardiovasculaire sont différentes selon l'altitude, le degré d'exposition, la durée et du niveau d'entraînement. Mais, en général, il existe une activation du système nerveux autonome pendant l'exercice dans une situation d'hypoxie, cette modulation disparaît et l'équilibre sympathique/parasympathique est restauré.

Au-delà de 1200 mètres, on peut commencer à observer les effets de l'altitude sur notre organisme, tant dans un exercice de faible intensité comme dans un exercice sous-maximal nous trouverons des adaptations au niveau cardiaque ; cependant, pendant un exercice d'intensité supra-maximal il n'y aura pas d'adaptation en comparaison avec l'exercice au niveau de la mer. Vivre haut et s'entraîner bas provoquera des modifications, mais celles-ci disparaissent en deux semaines.

Il est important de poursuivre les recherches sur cette ligne, mais un plus grand nombre d'études serait nécessaire et un même protocole d'interventions, afin d'obtenir des résultats plus fiables et extrapolables.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Achten J, Jeukendrup AE. Heart Rate Monitoring: Applications and Limitations. *Sports Medicine* 2003;33(7):517.
- (2) Fox SI. Sangre, corazón y circulación. Fisiología humana. 12th ed. México: McGraw- Hill Interamericana; 2011. p. 418-426.
- (3) Perini R, Veicsteinas A. Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. *Eur J Appl Physiol* 2003;90(3-4):317.
- (4) Urdampilleta A. Tipos de hipoxia, sistemas de simulación de hipoxia intermitente y protocolos de entrenamiento. *EF deportes* 2012;171.
- (5) Bernardi L, Passino C, Serebrovskaya Z, Serebrovskaya T, Appenzeller O. Respiratory and cardiovascular adaptations to progressive hypoxia; effect of interval hypoxic training. *Eur Heart J* 2001;22(10):879.
- (6) Povea C, Schmitt L, Brugniaux J, Nicolet G, Richalet J, Fouillot J. Effects of intermittent hypoxia on heart rate variability during rest and exercise. *High Alt Med Biol* 2005;6(3):215.
- (7) Buchheit M, Richard P, Doutreleau S, Lonsdorfer-Wolf E, Brandenberger G, Simon C. Effect of Acute Hypoxia on Heart Rate Variability at Rest and During Exercise. *Int J Sports Med* 2004 - ;25(4):264.
- (8) Basualto- Alarcóna C, Rodasb G, Galileac P, Rierac J, Pagésd T, Ricarte A, et al. Parámetros cardiorrespiratorios durante el ejercicio submáximo bajo una exposición aguda a hipoxia hipobárica y normobárica. *Apunts Medicina de l'esport* 2012;47(174):65.
- (9) Brugniaux J. Heart rate variability and altitude: Implications for training. International symposium of altitude training. University of Calgary, Alberta, Canada.
- (10) Cornolo J, Brugniaux JV, Macarlupu JL, Privat C, León-Velarde F, Richalet JP. Autonomic adaptations in andean trained participants to a 4220-m altitude marathon. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(12):2148.
- (11) GIBELLI G, FANTONI C, ANZ C, CATTANEO P, ROSSI A, MONTENERO AS, et al. Arrhythmic Risk Evaluation during Exercise at High Altitude in Healthy Subjects: Role of Microvolt T-Wave Alternans. *Pacing & Clinical Electrophysiology* 2008;31(10):1277.
- (12) Schmitt L, Fouillot J-, Millet GP, Robach P, Nicolet G, Brugniaux J, et al. Altitude, Heart Rate Variability and Aerobic Capacities. *Int J Sports Med* 2008;29(4):300.
- (13) Saito S, Tanobe K, Yamada M, Nishihara F. Relationship between arterial oxygen saturation and heart rate variability at high altitudes. *Am J Emerg Med* 2005;23(1):8-12.

- (14) Mairer K, Wille M, Grander W, Burtcher M. Effects of Exercise and Hypoxia on Heart Rate Variability and Acute Mountain Sickness. *Int J Sports Med* 2013;34(8):700.
- (15) Koelwyn GJ, Wong LE, Kennedy MD, Eves ND. The effect of hypoxia and exercise on heart rate variability, immune response, and orthostatic stress. *Scand J Med Sci Sports* 2013 - ;23(1):e1.
- (16) Buchheit M, Kuitunen S, Voss SC, Williams BK, Mendez-Villanueva A, Bourdon PC. Physiological strain associated with high-intensity hypoxic intervals in highly trained young runners. *Journal Of Strength And Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association* 2012;26(1):94.
- (17) Woorons X, Bourdillon N, Lamberto C, Vandewalle H, Richalet J, Mollard P, et al. Cardiovascular Responses During Hypoventilation at Exercise. *Int.J.Sports Med.* 2011;32(6):438.
- (18) Zupet P, Princi T, FINDERLE Z. Effect of hypobaric hypoxia on heart rate variability during exercise: a pilot field study. *European journal of applied physiology* 2009;107:345.
- (19) Haddad HA, Mendez-Villanueva A, Bourdon PC, Buchheit M. Effect of acute hypoxia on post-exercise parasympathetic reactivation in healthy men. *Frontiers in Physiology* 2012 - ;3:1.
- (20) Schmitt L, Hellard P, Millet GP, Roels B, Richalet J, Fouillot J-. Heart Rate Variability and Performance at Two Different Altitudes in Well-Trained Swimmers. *Int J Sports Med* 2006 - ;27(3):226.
- (21) Cornolo J, Fouillot J, Schmitt L, Povea C, Robach P, Richalet J-P. **Interactions between exposure to hypoxia and the training-induced autonomic adaptations in a “live high–train low” session.** *Eur J Appl Physiol* 2006;96(4):389.
- (22) Jouanin JC, Dussault C, Van Beers P, Piérard C, Beaumont M. **Short half-life hypnotics preserve physical fitness and altitude tolerance during military mountainous training..** *Mil Med* 2009;174(9):964.

7. ANEXOS

ANEXO 1

Proceso de selección y exclusión a partir del título o resumen de los artículos buscados hasta la fecha del 30 de septiembre de 2014.

WEB OF SCIENCE

Búsqueda: “VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA”= 62 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	3
Casos clínicos o sujetos con patologías	44
No hipoxia	11
Sujetos neonatos	3
Fetos	1
ARTÍCULOS VÁLIDOS	0

Búsqueda: “VARIABILITÉ DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE”= 20 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	1
Casos clínicos o sujetos con patologías	14
No hipoxia	3
Animales	2
ARTÍCULOS VÁLIDOS	0

Búsqueda: “HEART RATE VARIABILITY” AND HYPOXIA =328 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	8
No ejercicio	69
Casos clínicos o sujetos con patologías	103
No hipoxia	2
Hipoxia hiperbárica	3
embarazadas	2
Fetos	52
Neonatos o niños	19
Animales	36
ARTÍCULOS VÁLIDOS	34

Búsqueda: "HEART RATE VARIABILITY" AND HYPOXIA AND EXERCISE= 58 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	8
No ejercicio	16
Casos clínicos o sujetos con patologías	9
Hipoxia hiperbárica	3
Sujetos neonatos o niños	1
Animales	1
ARTÍCULOS VÁLIDOS	20

PUBMED

Búsqueda: "HEART RATE VARIABILITY " OR HRV AND HYPOXIA =183 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	2
No ejercicio	44
Casos clínicos o sujetos con patologías	36
No hipoxia	3
Hipoxia hiperbárica	1
embarazadas	1
Fetos	40
Neonatos o niños	12
Animales	26
ARTÍCULOS VÁLIDOS	18

SPORT DISCUS

Búsqueda: "HEART RATE VARIABILITY" AND HYPOXIA= 28 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
No HRV	1
No ejercicio	10
Casos clínicos o sujetos con patologías	1
No hipoxia	3
Hipoxia hiperbárica	1
Neonatos o niños	1
Animales	1
ARTICULOS VÁLIDOS	10

Búsqueda: “VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA” = 5 RESULTADOS

MOTIVO DE EXCLUSIÓN	NÚMERO
Casos clínicos o sujetos con patologías	1
No hipoxia	4
ARTICULOS VÁLIDOS	0